

Physikalische modellierung und simulation des material- und strukturverhaltens thermisch gespritzter schichten

Svendsen, Bob; Hortig, Christian; Klusemann, Benjamin

Published in: 3D-Surface Engineering fr Werkzeugsysteme der Blechformteile- fertigung, 2

Publication date: 2008

Document Version Verlags-PDF (auch: Version of Record)

Link to publication

Citation for pulished version (APA): Svendsen, B., Hortig, C., & Klusemann, B. (2008). Physikalische modellierung und simulation des material- und strukturverhaltens thermisch gespritzter schichten. In W. Tillmann (Hrsg.), 3D-Surface Engineering fr Werkzeugsysteme der Blechformteile- fertigung, 2: SFB708 - 2. öffentliches Kolloquium: Praxiswissen (S. 121–132). (SFB 708). Verlag Praxiswissen.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
 You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

PHYSIKALISCHE MODELLIERUNG UND SIMULATION DES MATERIAL- UND STRUKTURVERHALTENS THERMISCH GESPRITZTER SCHICHTEN

B. Svendsen, C. Hortig, B. Klusemann Lehrstuhl für Mechanik, TU Dortmund

Kurzfassung

Gegenstand der Forschungsprojekte ist die Untersuchung des umformtechnischen Verhaltens und die gezielte Beeinflussung der thermisch gespritzten Schichten durch inkrementelle Walzprozesse zur Anpassung der Eigenschaften an die Anforderungen des Tiefziehprozesses. Als Beitrag zur Prozessoptimierung werden Simulationsmodelle zur Beschreibung der Mikrostruktur- und Eigenspannungsentwicklung im System "Beschichtung-Substrat", sowie dessen Systemverhalten entwickelt.

Hierzu erfolgt in der vorliegenden Arbeit zunächst eine makroskopische Simulation des Vorgangs mit einem etablierten Materialmodell. Im zweiten Schritt wird eine genauere Untersuchung der Verdichtungsvorgänge in der Mikrostruktur mithilfe eines thermoelastisch viskoplastischen Modells für das Matrixmaterial durchgeführt.

Die makroskopische Simulationsergebnisse zeigen, dass der Verdichtungsvorganges mit Hilfe eines homogenisierten Materialmodells qualitativ richtig dargestellt wird. Die durchgeführten Mikrostruktursimulationen bzw. die Simulation des Porenschließvorganges offenbaren die komplexen Ver- und Entfestigungsmechanismen bei der Verdichtung einer porösen Mikrostruktur. Die hierbei ermittelten Ergebnisse mittels explizitem und implizitem Lösungsalgorithmus liefern zum Teil abweichende Resultate. Die Untersuchung der Ursachen hierfür ist Bestandteil aktueller Forschungsaktivitäten.

Stichwörter: FEM, Mikrostruktur, Verformungslokalisierung, thermoelastisch viskoplastische Materialmodellierung



1 **Makroskopische Simulation**

Eine erste Annäherung an die Simulation des Verdichtungsverhaltens der thermisch gespritzten Schicht erfolgt mit Hilfe eines homogenisierten Materialmodells. Hier wird auf das Gurson-Modell zurückgegriffen [1,2]. Dieses erlaubt ein Öffnen bzw. Schliessen der Mikroporen durch folgende Evolutionsgleichung

$$\dot{f} = \dot{f}_{\rm gr} + \dot{f}_{\rm nucl}$$
 .

Hierbei bezeichnet \dot{f} die Entwicklung des Hohlraumvolumens. Diese Entwicklung wird einerseits durch plastisches Fliessen

$$\dot{f}_{\rm gr} = (1-f)\dot{\varepsilon}_{\rm pl}\cdot\boldsymbol{I},$$

andererseits durch das Verschmelzen schon vorhandener Hohlräume

$$\dot{f}_{nucl} = A \, \dot{\varepsilon}_{\rm pl}$$

hervorgerufen. Das Verfestigungsverhalten des Materials wird als linear verfestigend modelliert.

Abbildung 1 zeigt die FE-Simulation des Verdichtungsvorganges im Überblick. Das Werkstück besteht aus einer massiven Trägerschicht und einer zu anfangs unverdichteten Schicht mit homogener Porosität von 50 %. Das Werkzeug wird als ideal starre Kugel modelliert.



Abb. 1: Makroskopische Simulation des Verdichtungsprozesses mit homogenisiertem Materialmodell

Nach einer kurzen Einlaufzone stellt sich eine, entlang des Werkzeugpfades gleichmässige Verdichtung unterhalb des Werkzeuges ein. Wie in Abbildung 2 zu sehen, kommt es aufgrund der hohen Anfangsporösität zu keiner Überschwappung am Rand der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück. Eine Verdichtung erfolgt nur unmittelbar unterhalb der Kontaktfläche.









Abb. 2: Verteilung der lokalen Porosität in einem Schnitt orthogonal zum Werkzeugpfad.

2 Simulation mit expliziter Abbildung der Mikrostruktur

Im nächsten Schritt erfolgt eine Simulation mit expliziter Abbildung der Mikrostruktur. Aus Effizienzgründen wird hier nur der in Abbildung 3 dargestellte Ausschnitt simuliert. Zur Modellierung wird ein isotropes, thermoelastisches viskoplastisches Materialmodell basierend auf dem Johnson-Cook Ansatz [5] angenommen. Dieser wird im Rahmen eines expliziten Lösungsalgorithmus für die FE-Simulation in Abaqus / Explicit eingesetzt.



Abb. 3: Simulation mit expliziter Abbildung der Mikrostruktur. Aus Effizienzgründen wird hier nur der dargestellte Ausschnitt simuliert.

Basis dieser Simulation ist eine reale Darstellung der Mikrostruktur. Diese kann grundsätzlich über Schliffbilder realer Mikrostrukturen gewonnen werden (Abb. 4a). Als weitere Quelle können gerechnete Mikrostrukturen dienen (Abb. 4d). In beiden Fällen ist ein Bitmap der Ausgangsdatensatz. Mit Hilfe des Freeware Programms OOF erfolgt zunächst eine Identifikation der Mikrostrukturanteile (Abb. 4b) und im weiteren Verlauf eine Vernetzung und Übergabe in ein FE Programm (Abb. 4c) [3].





d)

Abb. 4: Arbeitsschritte zur Erstellung eines FE- Modells der Mikrostruktur. a) Erstellen eines Schliffbildes. b) Erfassen der unterschiedlichen Mikrostrukturanteile in OOF. c) Vernetzung in OOF und Übergabe an ein FE Programm. d) Eine weitere Quelle zur Erzeugung von realen Mikrostrukturen stellen gerechnete Mikrostrukturen dar.

Das Simulationsergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt. Es zeigen sich Spannungskonzentrationen und daraus resultierende Verformungslokalisierungen in Bereichen eng benachbarter Hohlräume.



Abb. 5: Simulation des Verdichtungsvorganges mit expliziter Darstellung der Mikrostruktur. Deutlich zu erkennen die Spannungskonzentrationen in Bereichen eng benachbarter Hohlräume.





Um nähere Erkenntnisse über den Spannungs- und Deformationszustand im Bereich der Hohlräume zu erlangen, wird eine Simulation des Porenschliessvorganges durchgeführt. Eine Pore wird hier stark vereinfacht als Kreis dargestellt (Plane Strain Bedingungen) (Abb. 6a). Um eine ausreichende Auflösung des



Abb. 6: Simulation des Porenschließvorganges. a) Eine Pore wird hier stark vereinfacht als Kreis dargestellt (Plane Strain). b,c) Es erfolgen Simulationen bei verschiedenen Verformungsmoden. Wie in der oben dargestellten Simulation der Mikrostruktur zeigen sich auch hier Spannungskonzentrationen und in der Folge Verformungslokalisierungen. Abhängig vom Verformungsmodus können auch Scherbänder beobachtet werden (b).

Spannungs- bzw. Deformationsfeldes zu gewährleisten wird die Simulation mit adaptiver Neuvernetzung durchgeführt. Die Simulationen bei verschiedenen Verformungsmoden (Abb. 6b, Abb. 6c) zeigen auch hier, wie in der oben dargestellten Simulation der Mikrostruktur, Spannungskonzentrationen und in der Folge



Verformungslokalisierungen. Abhängig vom Verformungsmodus können auch Scherbänder beobachtet werden (Abb 6b).

Diese expliziten Lösungen könnten insbesondere problematisch sein, wenn die Steifigkeit des Materials während des Prozess variiert. Bei viskoplastischen Modellen könnte dies aufgrund Verfestigungs- und Entfestigungsverhalten vorkommen und zu nicht-akzeptablen Ungenauigkeiten führen [4].

Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein vergleichbares Materialmodell in Abaqus/ Standard implementiert. Das Modell basiert auf der Annahme, dass das elastische Materialverhalten isotrop ist. In diesem Fall erhält man die Form

$$\boldsymbol{K} = \kappa_0 \{ \operatorname{tr}(\ln \boldsymbol{V}_{\mathrm{E}}) + 3 \,\alpha_0(\theta_0 - \theta) \} \, \boldsymbol{I} + 2 \,\mu_0 \operatorname{dev}(\ln \boldsymbol{V}_{\mathrm{E}})$$

für die Kirchhoff-Spannung K als Funktion der Temperatur θ und des logarithmischen linken Streck-Tensors $\ln V_E$. Aufgrund des angenommenen isotropen Fließverhaltens wird als Fließpotential die von Mises Form

$$\phi_{\rm F} = \sqrt{3/2} \, \sigma_{\rm P}$$

verwendet, mit $\sigma_{\rm P} = \max(\operatorname{dev}(\mathbf{K}))$. Zusammen mit $\phi_{\rm F}$, bestimmt die modifizierte Johnson-Cook Form für das Dissipationspotential

$$\chi = \sigma_{jc} \dot{\alpha}_0 \left\{ c_0 \left(1 + \frac{\dot{\alpha}_P}{\dot{\alpha}_0} \ln \left(1 + \frac{\dot{\alpha}_P}{\dot{\alpha}_0} \right) + (1 - c_0) \frac{\dot{\alpha}_P}{\dot{\alpha}_0} \right) \right\} \\ + \frac{1}{2} \theta^{-1} k_0 \det(\mathbf{F}) \mathbf{F}^{-1} \nabla \theta \cdot \mathbf{F}^{-T} \nabla \theta$$

das Fließverhalten. Hierbei entsprechen $\dot{\alpha}_0$ der Referenzdehnrate, $\dot{\alpha}_p$ der aktuellen inelastischen Vergleichsdehnrate, c_0 dem Koeffizient der Ratenabhängigkeit und k_0 dem Wärmeleitungskoeffizient. $\sigma_{\rm jc}$ enthält die Abhängigkeit des Fließverhaltens von der inelastischen Vergleichsdehnung $\alpha_{\rm p}$ und der Temperatur θ . Im Gegensatz zum üblichen Johnson-Cook Ansatz, wird hier die dehnungsbezogene Verfestigung durch den Ansatz von Voce modelliert. a_0 beschreibt die anfängliche Fließspannung, b_0 die Differenz zwischen anfänglicher und Sättigungsfließspannung, n_0 die Sättigungsrate, θ_0 die Referenztemperatur, θ_m die Schmelztemperatur sowie m_0 den Entfestigungskoeffizient. Es gilt

$$\sigma_{\rm jc}(\theta,\alpha_{\rm P}) = \left[a_0 + b_0(1 - e^{-n_0\alpha_{\rm P}})\right] \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_{\rm m} - \theta_0}\right)^{m_0}\right].$$

Daraus ergibt sich die Fließregel als

$$\sigma_{\rm P} = \partial_{\dot{\alpha}_{\rm P}} \chi_r = \sigma_{\rm jc} \left[1 + c_0 \ln \left(1 + \frac{\dot{\alpha}_{\rm p}}{\dot{\alpha}_0} \right) \right].$$





Das implementierte Modell wurde mittels Zug- und Scherversuche identifiziert. Mit Hilfe des Materialmodells werden die in Abb. 6 durchgeführten Simulationen wiederholt und verglichen. Abb. 7 zeigt die resultierenden Ergebnisse.



Abb. 7: Simulation des Porenschließvorganges. a) Simulation mit Symmetrierandbedingungen.b) Simulation ohne Symmetrierandbedingungen. Wie in der oben dargestellten Simulation der Mikrostruktur zeigen sich auch hier Spannungskonzentrationen und in der Folge Verformungslokalisierungen.

Wie in Abb. 6, zeigen sich auch hier Spannungskonzentrationen und daraus folgernde Verformungslokalisierung, jedoch scheint es nicht zu einer Scherbandbildung zu kommen. In aktuellen Untersuchungen wird geprüft, woran diese Unterschiede liegen.

Demnächst werden die so gewonnenen Einsichten in den Porenschließprozess auf die Modellierung einer repräsentativen Mikrostruktur mit mehreren Poreneinschlüssen übertragen. Dieser repräsentative Ausschnitt der Mikrostruktur stellt dabei eine Kalibrierungsmöglichkeit für das zu entwickelnde inelastische temperaturabhängige Materialmodell für poröse, mehrphasige Werkstoffe dar.

3 Zusammenfassung

Bereits in der einführenden makroskopischen Betrachtung konnte gezeigt werden, dass die Simulation des Verdichtungsvorganges mit Hilfe eines homogenisierten Materialmodells grundsätzlich möglich ist. Das hier verwendete Gurson Modell ist jedoch ursprünglich im Zusammenhang verformungsinduzierter Schädigung und Mikrohohlräumen definiert. Eine Übertragung auf die Situation der Verdichtung von gespritzten Hohlräumen erfolgte hier nur zu Demonstrationszwecken. Die durchgeführten Simulationen mit einer expliziten Darstellung der Mikrostruktur und die Simulation des Porenschließvorganges offenbaren die komplexen Ver- und Entfestigungsmechanismen bei der Verdichtung einer porösen Mikrostruktur. Die so gewonnen Einsichten werden in aktuellen Forschungsaktivitäten für die Kalibrierung des entwickelnden inelastischen temperaturabhängigen zu Materialmodells für poröse, mehrphasige Werkstoffe eingesetzt.





Danksagung

Diese Arbeit ist im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 708 entstanden. Die Autoren danken für die Förderung der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Literatur

- [1] Svendsen, B., Hortig, C., Reusch, F., Nonlocal modeling and simulation of ductile damage and failure in metal matrix composites, Journal of Engineering Materials and Technology 130, 021009, 2008.
- [2] Svendsen, B., Reusch, F., Klingbeil, D., Local and non-local Gurson-based ductile damage and failure modelling at large deformation, European Journal of Mechanics - A/SolidsVolume 22, Issue 6, pp. 779-792, 2003.
- [3] Langer, S., Fuller Jr., E., Carter, W., OOF: An Image-based Finite-Element Analysis of Material Microstructures, Computing in Science & Engineering, Volume 3, pp. 15-23, 2001.
- [4] Belytschko, T., Liu, W. K., Moran, B., Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, 1st edition, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 2000.
- [5] Johnson, G.R., Cook, W.H., Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No.1, pp. 31-48, 1985.

